

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ზაზა პაპიძე

ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში პროცესების  
მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია

შიფრი: 0405

თბილისი

2017 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი  
ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი გივი კოხრეიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2017 წლის "-----" -----, ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის  
სხდომაზე, კორპუსი VIII, აუდიტორია N  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

/ გ. გიგინეიშვილი /

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

### თემის აქტუალობა

ქვეყნის ცალკეული შორეული რაიონების ელექტრომომარაგებაში, თუ ენერგოსისტემის განვითარება შეუძლებელია და ფასები საწვავზე და სათბობზე მიუღებლად მაღალია რთული ტრანსპორტირების გამო, ელექტროენერგეტიკის განვითარების თანამედროვე ეტაპზე მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ელექტროენერჯის ალტერნატიული წყაროების (მზის ელემენტების, ქარის გენერატორების, აკუმულიატორული ბატარეებისა და დიზელგენერატორების) ბაზაზე მუდმივი და ცვლადი დენის ავტონომიური ჰიბრიდული ენერგოსისტემის შექმნასა და გამოყენებას.

ალტერნატიული წყაროების ენერჯების ერთდროული ან მიკროპროცესორული კონტროლიორით სელექციურობის გზით გამოყენება ნახევარგამტარული მართვადი გარდამქმნელების ბაზაზე წარმოადგენს ძირითად საფუძველს, როგორც მუდმივი, ასევე ცვლადი ძაბვის ჰიბრიდული ენერგოსისტემის განვითარებისათვის.

მდგრადი და საიმედო ელექტრომომარაგების უზრუნველყოფის და ჭარბი ელექტრული ენერჯის მიმღებ ქსელში შეშვების მიზნით ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება წარმოადგენს სადისერტაციო თემის მეტად აქტუალურ საკითხთა ერთობლიობას, რომლებიც დამუშავებულია ავტორის მიერ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტში სამი წლის განმავლობაში შესრულებული გამოკვლევების საფუძველზე.

### სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები.

დისერტაციის მიზანია მდგრადი და საიმედო ელექტრომომარაგების უზრუნველყოფისათვის ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის შექმნა და მიმღებ ქსელთან

პარალელური მუშაობის პირობებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების თეორიის განვითარება შესაბამისი მეთოდების დამუშავებით. ყოველივე ეს იძლევა ენერჯის არატრადიციული და განახლებადი წყაროების გარდაქმნისა და გამოყენების ეფექტური ტექნოლოგიების დანერგვის საშუალებას ელექტროტექნიკასა და ელექტროენერგეტიკაში.

**კვლევის ამოცანებია** შემდეგი ძირითადი მნიშვნელოვანი საკითხების გადაწყვეტა:

1. ქარის და მზის ენერჯის ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნის და გამოყენების ტექნოლოგიების დამუშავება;

2. ქარის ასინქრონული გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე სამფაზა ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობების თეორიული, ზოგადი გამოსახულებების მიღება ქარის, ლილვზე დამაგრებული ფრთის და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ყველა არსებული, დასაშვები პარამეტრების გათვალისწინებით;

3. მზის ელემენტის საინჟინრო გათვლებისთვის მოხერხებული ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გამოსახულების მიღება კვადრატული სამწევრის სახით უქმი სვლის, ოპტიმალურ-ექსტრემალური და მოკლედ შერთვის რეჟიმების დამახასიათებელი შესაბამისი სამი წერტილის კოორდინატების მიხედვით ტეილორის მწკრივებად და ლაგრანჟის ინტერპოლაციის ფორმულების გამოყენების საფუძველზე;

4. ქარის, მზის, დიზელგენერატორების და აკუმულიატორული ბატარეების შესაბამისი ელექტრული ენერჯიების მიკროპროცესორული კონტროლიორებით სელექციურობის საფუძველზე თანამედროვე ჰიბრიდული მუდმივი და ცვლადი დენის ენერგოსისტემის განზოგადებული სტრუქტურული და საანგარიშო ელექტრული სქემების მიღება ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში;

5. ელექტრული სიდიდეების დროში ცვალებადობის ერთი პერიოდის განმავლობაში ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში მდგრადი განზოგადებული რეჟიმების დადგენა და ჰიბრიდული ელექტრული სადგურის გამომავალი ძაბვის, ტირისტორების მართვის იმპულსების, კომუტაციური ფუნქციების და მიმღები ქსელის ძაბვის დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერების ალგორითმის შედგენა;

6. ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების სრულყოფილი მეთოდის დამუშავება; საძიებელი ელექტრული სიდიდეების რეზულტირებული კომპლექსური მნიშვნელობების მიმართ ელექტრული წონასწორობის კომპლექსური განტოლებათა სისტემის შედგენა განზოგადებული კენტი და ლუწი დროის ინტერვალებისათვის; კომპლექსურ რეზულტირებულ ცვლადთა უკუ გარდაქმნის მატრიცების საფუძველზე შესაბამისი ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების გამოსახულებების მიღება;

7. მოცემულ პარამეტრებზე დამოკიდებული გარდამავალი პროცესების დამთავრებისა და დამყარებული პროცესების დაწყების ერთი და იგივე შესაბამისი განზოგადებული  $n$ -ინტერვალების გამოსახულებების მიღება, გამომდინარე ერთმანეთის მომდევნო  $2n-1$  კენტ და  $2n$  ლუწ ინტერვალებში ელექტრული სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობების გამოსახულებების ერთმანეთთან გათანაბრების საფუძველზე;

8. თითოეულ დროის ინტერვალში საანგარიშო ელექტრული სიდიდეების წარმოებულების გამოსახულებების განსაზღვრა მატრიცულ ფორმაში და, შესაბამისად, კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობის განსაზღვრა მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ჩვენს მიერ გამოყვანილი გამოსახულების გათვალისწინებით;

9. წარმოდგენილ გარდამქმნელ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების

მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების შედეგად შესაბამისი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება;

10. დისერტაციაში წარმოდგენილ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში საძიებელ ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების შედგენისა და მათი რიცხვითი ამოხსნის მეთოდის დამუშავება რეკურენტული ფორმულის სახით შესაბამისი სხვაობითი განტოლებების მიღების მიზნით.

**კვლევის მეთოდები:** წარმოდგენილი ამოცანების თეორიული საფუძვლების დასამუშავებლად დისერტაციაში გამოყენებულია წრფივი და არაწრფივი ელექტრული წრედების, დისკრეტული და ცვლად პარამეტრებიანი დინამიკური სისტემების, განზოგადებული ფუნქციების თეორიები, ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი, გაანგარიშების რიცხვითი მეთოდი და კომპიუტერული მოდელირების თეორიული საფუძვლები.

#### **ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:**

დისერტაციის შესრულებულ ნაშრომში მოყვანილია ენერგეტიკისა და ელექტროინჟინერიის დარგის მნიშვნელოვანი პრობლემის ძირითადი საკითხების - „ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში პროცესების მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში“ - დამუშავების თეორიული განზოგადება და გადაწყვეტა. ახალი მეცნიერული შედეგებიდან შეიძლება აღინიშნოს შემდეგი:

1. დამუშავებულია ენერჯის არატრადიციული და განახლებადი წყაროები. ქარის, მზის და აკუმულიატორული ბატარეების ენერჯების გარდაქმნისა და მიკროპროცესორული კონტროლიორების საფუძველზე მათი სელექციურობის გზით ენერგეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში გამოყენების ტექნოლოგიები;

2. ტეილორის მწკრივებად დაშლისა და ლაგრანჟის ინტერპოლაციური ფორმულების გამოყენებით მზის ელემენტის უქმი სვლის, ოპტიმალური და მოკლე შერთვის რეჟიმების შესაბამისი სამი წერტილის დენისა და ძაბვის

კოორდინატების საფუძველზე, პირველად მიღებული იქნა ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის განზოგადებული ანალიზური გამოსახულება კვადრატული სამწევრის სახით, სამართლიანი საინჟინრო გაანგარიშებების ეფექტურად ჩატარებისათვის;

3. პირველად მიღებულია ქარის ასინქრონული გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე სამფაზა ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობების თეორიული ზოგადი გამოსახულებები ქარის, ფრთისა და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ყველა შესაძლო არსებული პარამეტრების გათვალისწინებით. გაერთიანებული გარდამქმნელი ერთიანი ჰიბრიდული სისტემის მდგრადი რეჟიმების უზრუნველსაყოფად გენერატორის ფაზური ძაბვების გამოსახულებაში გათვალისწინებულია გენერატორის გამოსავალზე ძაბვის ვექტორსა და მიმღები ქსელის ძაბვის ვექტორს შორის ძვრის კუთხე;

4. შედგენილია თანამედროვე ჰიბრიდული მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტროენერგეტიკული ერთიანი სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული და საანგარიშო ელექტრული სქემები საქართველოს ელექტროსისტემის ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობისათვის აუცილებელი პირობების გათვალისწინებით;

5. პირველად, მუდმივი და ერთფაზა ცვლადი დენის ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკული სისტემისათვის ჩატარებულია გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების როგორც მათემატიკური, ასევე კომპიუტერული მოდელირება. მიღებულია საძიებელი ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების ზოგადი გამოსახულებები და კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე აგებულია მათი გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები;

6. დადგენილია ელექტრული სიდიდეების დროში ცვალებადობის ერთი პერიოდის განმავლობაში ერთმანეთის მიყოლებით კენტი და ლუწი ექვს-ექვსი რეჟიმი. აგებულია მათი დროში ცვალებადობის

კანონზომიერების ალგორითმი ნახევარგამტარული გარდამქმნელი სისტემის მდგრადი და საიმედო მუშაობის უზრუნველყოფისათვის;

7. დამუშავებულია ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სამფაზა სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების მეთოდიკა, დაფუძნებული ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე. დადგენილია ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური პარამეტრები და კოეფიციენტები. მიღებულია შესაბამისი ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების ზოგადი გამოსახულებები.  $2n-1$  კენტი და  $2n$  ლუწი ინტერვალებში ელექტრული სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობების ერთმანეთთან გატოლების საფუძველზე მიღებულია დამყარებული პროცესების შესაბამისი ინტერვალების განზოგადებული გამოსახულებები ერთიანი წრედის პარამეტრებზე დამოკიდებულებით;

8. კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე მატრიცულ ფორმაში განსაზღვრულია თითოეული საძიებელი ელექტრული სიდიდეების დროში წარმოებულების განზოგადებული გამოსახულებები. მათ მნიშვნელში მოთავსებული დეტერმინანტის ნულთან გატოლების საფუძველზე მიღებულია კომპუტაციური გადაძახვების ოპტიმიზაციის პირობები;

9. განხილულია ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის აგებისათვის საჭირო შესაბამისი მათემატიკური ოპერაციების ელემენტების ძირითადი თვისებები. მათ საფუძველზე აგებულია გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები, რომლებშიც ნათლად ჩანს ელექტრულ სიდიდეებს შორის მათემატიკური ოპერაციების კავშირი საწყისი მნიშვნელობების გათვალისწინებით;

10. დამუშავებულია ერთიანი გარდამქმნელ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში საძიებელ ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების შედგენისა და მათი რიცხვითი ამოხსნის



მეთოდის კენტი და ლუწი განზოგადებული ინტერვალებისათვის. მიღებულია შესაბამისი სხვაობითი განტოლებები რეკურენტული ფორმულის სახით, რომელიც შეთავსებადია კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით რიცხვითი მეთოდებით გაანგარიშებასთან.

### **შედეგების გამოყენების სფერო**

1. ქარის და მზის ენერჯის ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნისა და მათი მიკროპროცესორული კონტროლიორით სელექციურობის გზით გამოყენების ტექნოლოგიების დამუშავებამ ენერჯეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში საფუძველი ჩაუყარა ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერჯეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული, პრინციპული, საანგარიშო და საექსპლუატაციო ელექტრული სქემების შექმნას ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში. ჩატარებული გამოკვლევების შედეგების გამოყენების მნიშვნელოვანი სფეროა ჭარბი ელექტრული ენერჯის სამფაზა ცვლადი დენის მიმღებ ქსელში შეშვება, აგრეთვე, ცენტრალური ელექტრომომარაგების ელექტროგადამცემი ხაზიდან გაცილებით შორს განლაგებული რადარული ტექნიკის, გეოდეზიური, გეოლოგიური და პირველი კატეგორიის მომხმარებელთა უწყვეტი სტაბილური ელექტრომომარაგება.

2. თანამედროვე ჰიბრიდულ პარალელური ელექტროენერჯეტიკული სისტემისათვის გათვალისწინებული მზის ფოტოელექტრული, ქარის გენერატორული სადგურის, აკუმულიატორული ბატარეების და დიზელგენერატორების ერთდროული მიკროპროცესორული კონტროლიორით სელექციური ექსპლუატაციის გამოკვლევამ დაადგინა ავტონომიურ ჰიბრიდულ ენერჯეტიკულ სისტემაში მუშაობის მდგრადი ერთმანეთის მიყოლებით ექვს-ექვსი კენტი და ლუწი რეჟიმი. შედეგების გამოყენების სფეროს გაფართოების მიზნით პროცესების ოპერატორული და დისპეტჩერული მართვა გაიოლებულია ერთიან გარდამქმნელიან

სისტემაში სწრაფმოქმედი, მაღალსიხშირული, იზოლირებულ საკეტიანი ბიპოლარული ტრანზისტორული (IGBT) მოდულების გამოყენებით.

3. ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელების გამოკვლევის შედეგების და რეკომენდაციების გამოყენების არეალია მთლიანი ავტონომიური ელექტროსისტემის სარელეო დაცვისა და პირველი კატეგორიის მომხმარებელთა სტაბილური და საიმედო ელექტრომომარაგების უზრუნველყოფის სფერო.

### **პუბლიკაციები და სამუშაოს აპრობაცია**

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია 8 ნაბეჭდ და 5 ხელნაწერის უფლებით არსებულ შრომაში. აქედან ორი- სამეცნიერო ტექნიკურ ჟურნალ „ენერჯიაში“- N3 (71) 2014 წ.; N4(72) 2014 წ., N2(82) 2017 წ. ერთი - საერთაშორისო შრომათა კრებულში (პოლონეთი: ვარშავა-2016 წ.) და სამი საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე (საქართველო, ქუთაისი, აწსუ - 2015 წლის 18 ივნისი, 2015 წლის 25 ნოემბერი, 2016 წლის 29-30 ოქტომბერი -ორი შრომა).

სამუშაოს შედეგები მოხსენებული იყო ორ სტუ-ს 83-ე და 84-ე სტუდენტთა საერთაშორისო ღია სამეცნიერო კონფერენციაზე (თბილისი-2015, 2016 წ.წ.), ორ თემატურ სემინარზე (თბილისი-2016, 2017წ.წ.), სამ საგანმანათლებლო პროგრამის კვლევითი კომპონენტის „კოლოქვიუმი“-ის სამეცნიერო სხდომაზე (თბილისი-2016 წ. - I კოლოქვიუმი და II კოლოქვიუმი, 2017წ.- III კოლოქვიუმი).

**დისერტაციის სტრუქტურა:** დისერტაცია შედგება შესავლის, ლიტერატურის მიმოხილვის, შედეგების და მათი განხილვისაგან, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. მთელი მოცულობა შეადგენს 122 გვერდს, მათ შორის 105 ძირითადი ტექსტია 25 ნახაზით. გამოყენებული ლიტერატურის სია შეიცავს 58 დასახელებას.

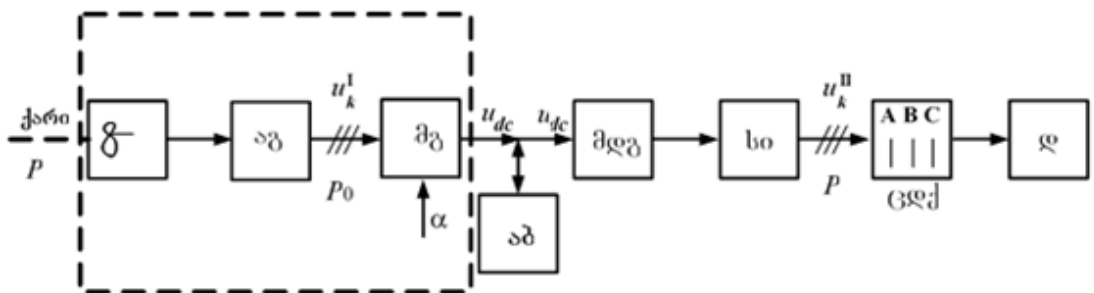
## დისერტაციის შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია პრობლემების აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია კვლევის მიზანი და ამოცანები. ნაჩვენებია სამუშაოს მეცნიერული სიახლის და პრაქტიკული მნიშვნელობის ძირითადი ასპექტები.

პირველი თავი ეძღვნება ქარის და მზის ენერჯის გარდაქმნის და გამოყენების ტექნოლოგიების დამუშავებას. აგებულია ქარის ელექტროსადგურის (ქეს), მართვადი გამმართველის (მგ), ცვლადი დენის ქსელის (ცდქ) სამფაზა ინვერტორის (სი) და შესაბამისი პარამეტრების მქონე მიმღები სამფაზა ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში არსებული ერთიანი გარდამქმნელის სტრუქტურული სქემა (ნახ.1). სქემაში გათვალისწინებულია მიკროპროცესორული კონტროლიორით პარალელურად მიერთებული აკუმულიატორული ბატარეა (აბ) და ცვლადი დენის ქსელის ექვივალენტური დატვირთვა (დ).

ქარის ასინქრონული გენერატორის სტატორის გრაგნილის მბრუნავი მაგნიტური ველის  $\Omega_1$  და როტორის გრაგნილის მბრუნავი მაგნიტური ველის  $\Omega$  – კუთხური სიხშირეების თანაფარდობის შესაბამისი  $S = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$

სრიალზე დამოკიდებულებით განხილულია გენერატორის მუშაობის ძრავური ( $0 < S < 1$ ); გენერატორული ( $-\infty < S < 0$ ) და დამუხრუჭების ( $1 < S < +\infty$ ) რეჟიმები.



ნახ.1. ქარის ელექტროსადგურისა და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის  
ამსახველი სტრუქტურული სქემა

აგებულია თითოეული რეჟიმისათვის  $\Omega$ -ს, როტორის გრაგნილში გამავალ  $I_2$  დენსა და მასში დაინდუქცირებულ  $E_2$  ე.მ.ძალას შორის ძვრის  $\psi_2=0$ -დან  $\psi_2 = \arctg\left(\frac{X_2}{R_2}\right)$ -მდე კუთხის  $S$ -სრიალზე დამოკიდებულების მრუდები.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ქარის გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე ფაზური  $u_k^l$ -ძაბვების მყისა მნიშვნელობების პარამეტრებზე დამოკიდებული ზოგადი გამოსახულების დადგენას.

ასინქრონული გენერატორის როტორის ლილვზე აქტიური სიმძლავრე რაიმე  $T$  ერთეული დროის განმავლობაში გამოითვლება ფორმულით:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot C_x \rho S (V_{\text{ქარ.}} - U_{\text{ვრთ.}})^2 \cdot U_{\text{ვრთ.}} \quad (1)$$

მეორეს მხრივ, ქარის გენერატორის მიერ ცვლადი დენის ქსელში გაცემული აქტიური სიმძლავრე გამოითვლება ფორმულით:

$$P = \frac{U^I U^{II}}{X_\Sigma} \sin \delta, \quad (2)$$

სადაც (1),(2)-ში შესაბამისად გვაქვს:

$C_x$  - ფრთის საქარე წინაღობის ჰაეროდინამიკური კოეფიციენტი;  $\rho$  - ქარის სიმკვრივე;  $S$  - ფრთის ზედაპირის ფართობი;  $V_{\text{ქარ.}}$  - ქარის საშუალო სიჩქარე;  $U_{\text{ვრთ.}}$  - ფრთის წრიული მოძრაობის სიჩქარე;  $U^I, U^{II}$  - შესაბამისად, ქარის სამფაზა გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის შესასვლელში ძაბვების მოქმედი მნიშვნელობები;  $\delta$  -  $U^I$  და  $U^{II}$  ძაბვების ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე;  $X_\Sigma$  - ნახ.1-ზე წარმოდგენილი სტრუქტურული სქემის ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური რეაქტიული წინაღობა.

(1), (2)-დან გამომდინარეობს, რომ

$$U_m^I = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{X_\Sigma C_x \rho S (V_{\text{ქარ.}} - U_{\text{ვრთ.}})^2 \cdot U_{\text{ვრთ.}}}{U_m^{II} \sin \delta}, \quad (3)$$

სადაც  $U_m^I, U_m^{II}$  - შესაბამისად, ძაბვების ამპლიტუდური მნიშვნელობებია.

ნახ.1-ზე ნაჩვენები  $u_k^I (k = A, B, C)$  ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობებისათვის ვლებულობთ შემდეგ გამოსახულებებს:

$$u_k^I = U_m^I \sin \left[ \omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \delta \right]. \quad (4)$$

როგორც (3), (4)-დან ჩანს, ქარის გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე ფაზური ძაბვების გამოსახულებებში ფუნქციონირებს ქარის ბორბალზე მოქმედი პარამეტრები:  $C_X, \rho, S, V_{ქარ.}, U_{ვრო.}$  და ცვლადი დენის მიმღები ქსელის ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა დამყარებული რეჟიმებისათვის. მნიშვნელოვანია ქარის ენერჯის გამოყენების კოეფიციენტის შემდეგი გამოსახულება:

$$\xi = C_X \left( 1 - \frac{U_{ვრო.}}{V_{ქარ.}} \right)^2 \cdot \frac{U_{ვრო.}}{V_{ქარ.}} \quad (5)$$

სამფაზა ბოგირული სქემით აგებული გამმართველის გამოსავალზე გამართული ძაბვის საშუალო  $U_{dc}$  მნიშვნელობა გამოისახება ფორმულით:

$$U_{dc} = \frac{6\sqrt{2} U_b^I \sin \frac{\pi}{6}}{\pi} = 1,35 \cdot U_b^I = 2,34U^I, \quad (6)$$

სადაც  $U_b^I$  არის  $u_k^I$  ფაზური ძაბვების შესაბამისი ხაზური ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა.

გამართვის პროცესში ჰარმონიკები ბლოკირდება გამმართველის გამოსავალზე პარალელურად მიერთებული კონდენსატორის ტევადობით.

(6)-ში  $U^I$  სიდიდისათვის გვაქვს

$$U^I = \frac{U_m^I}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{X_\Sigma C_X \rho S (V_{ქარ.} - U_{ვრო.})^2 \cdot U_{ვრო.}}{U_m^{II} \sin \delta}. \quad (7)$$

საბოლოოდ, ნახ. 1-ზე ნაჩვენები  $U_{dc}$  ძაბვისთვის ვლებულობთ:

$$U_{dc} = 2,34U^I = 0,83 \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{X_\Sigma C_X \rho S (V_{ქარ.} - U_{ვრო.})^2 \cdot U_{ვრო.}}{U_m^{II} \sin \delta}. \quad (8)$$

ნახ.2-ზე წარმოდგენილია მზის ელემენტის შენაცვლების ელექტრული სქემა და გამოყვანილია მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი კვადრატული სამწევრის სახით ფარდობით ერთეულებში (ნახ.3):

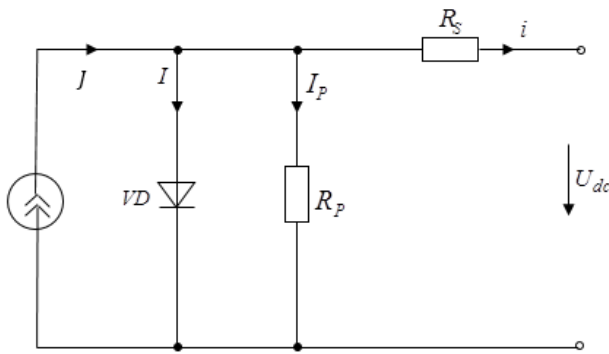
$$U_{dc}^* = A_1 (i^*)^2 - (1 + A_1) i^* + 1 \quad (9)$$

სადაც, (9)-ში  $A_1$  - კოეფიციენტი გამოისახება ოპტიმალური დენისა და ძაბვის ფარდობითი მნიშვნელობებით.

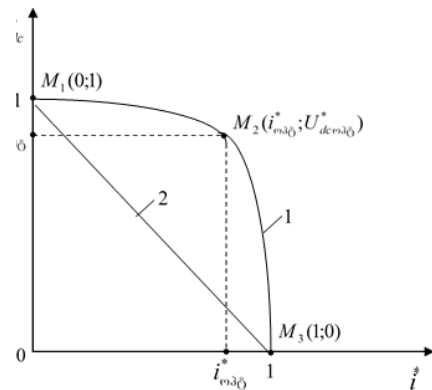
$$A_1 = \frac{1}{i_{\text{ოპტ}}^*} + \frac{U_{dc \text{ ოპტ}}^*}{[i_{\text{ოპტ}}^* (i_{\text{ოპტ}}^* - 1)]} \quad (10)$$

(10)-ში შემავალი  $i_{\text{ოპტ}}^*$ ,  $U_{dc \text{ ოპტ}}^*$ -ოპტიმალური დენი და ძაბვა განისაზღვრება მზის ელემენტის აქტიური სიმძლავრის ფარდობით ერთეულებში,  $P^* = U_{dc}^* \cdot i^*$  გამოსახულების  $i^*$ -დენის მიხედვით გაწარმოების და  $\frac{dP^*}{di^*} = 0$  ნულთან გატოლებიდან გამომდინარე.

შესაბამისად, ვღებულობთ დენის ოპტიმალურ ფარდობით  $i_{\text{ოპტ}}^*$  - გამოსახულებას, ხოლო ამ უკანასკნელის მეშვეობით კი - ოპტიმალური ძაბვის ფარდობით  $U_{dc \text{ ოპტ}}^*$  მნიშვნელობას. ამრიგად, მზის ელემენტის



ნახ.2. მზის ელემენტის შენაცვლების ელექტრული სქემა



ნახ.3. მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი

ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ასაგებად გვაქვს სამი წერტილის კოორდინატები ცნობილი:  $M_1(0,1)$ ;  $M_2(i_{\text{ოპტ}}^*; U_{dc \text{ ოპტ}}^*)$ ;  $M_3(1,0)$ .

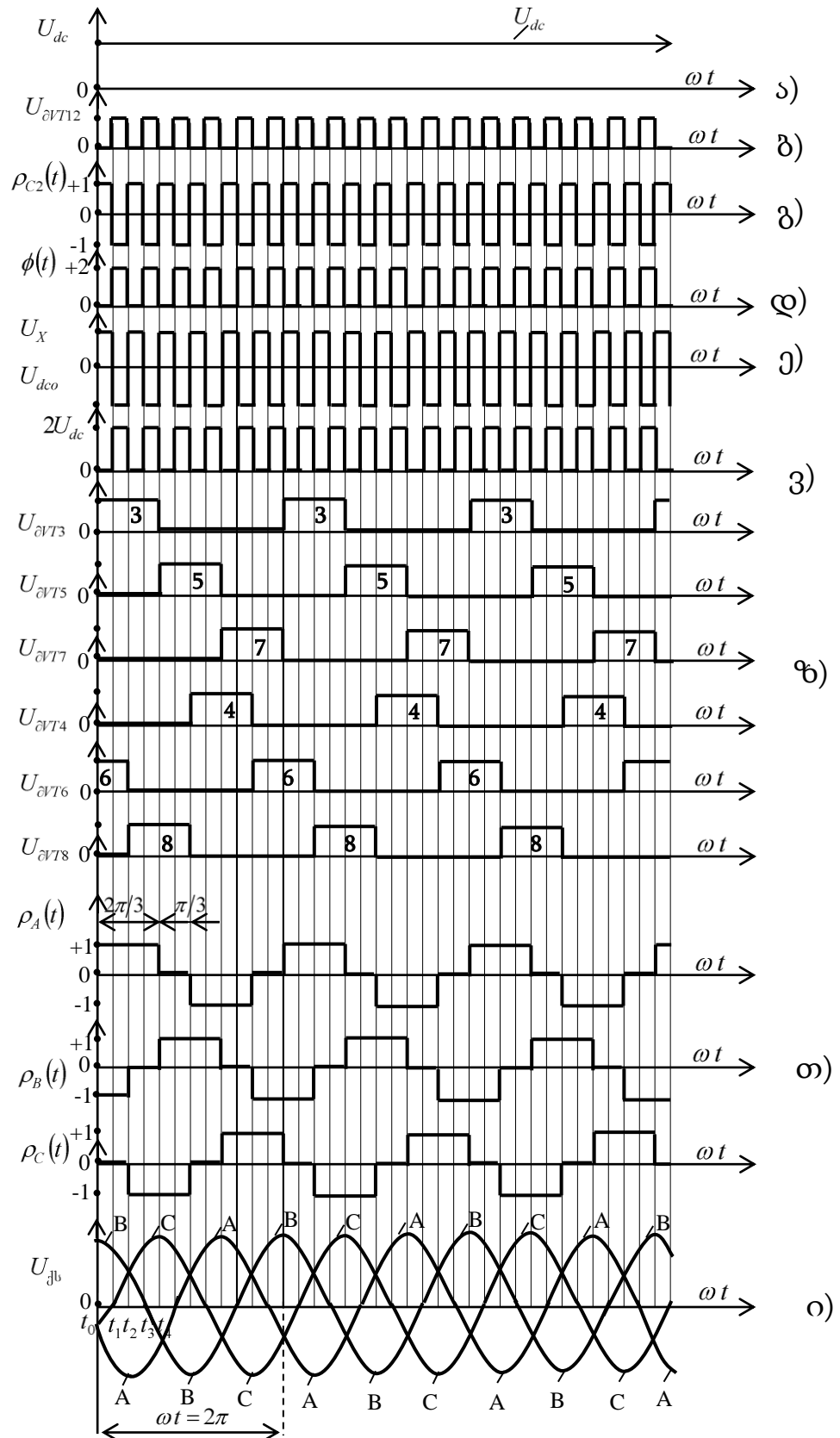
ლაგრანჟის ინტერპოლაციური ფორმულის გამოყენებით და რამოდენიმე შესაბამისი ალგებრული გარდაქმნების შემდეგ ვღებულობთ ნახ.3-ზე აგებული ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის (9) განტოლებას.

თეორიული გამოკვლევებიდან გამომდინარე, აუცილებელი და საკმარისია ტელიორის მწკრივებად დაშლაში გათვალისწინებული იქნას პირველი სამი წევრი.

**მეორე თავი** ეძღვნება ავტონომიურ ჰიბრიდულ ენერგეტიკულ სისტემაში საექსპლუატაციო მუშაობის მდგრადი რეჟიმების დადგენას; ჰიბრიდული ელექტრული სადგურების გამომავალი  $U_{dc}$  ძაბვის, ნახევარგამტარული მართვადი ვენტილების მართვის იმპულსების და კომუტაციური ფუნქციების, აგრეთვე სამფაზა ცვლადი დენის მიმღები ქსელის ძაბვების დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერების დადგენას (ნახ.4), ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემის აგებას (ნახ.5), რაც თავისთავად შეიცავს ქეს-ქარის ელექტროსადგურს, მეს-მზის ელექტროსადგურს, აბ-აკუმულატორულ ბატარეას, აჰეს-ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემას, მდგ-მუდმივი დენის გარდამქმნელს, სქმი-სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორს, სცდქ-სამფაზა ცვლადი დენის მიმღებ ქსელს; ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკული სისტემის ცვლადი დენის მიმღები სამფაზა ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში კენტი და ლუწი ერთმანეთის მიყოლებული განზოგადებული რეჟიმების საანგარიშო ელექტრული სქემის აგებას (ნახ.6).

**მესამე თავი** ეძღვნება ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტრო-ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკურ და კომპიუტერულ მოდელირებას ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში.

შედგენილია ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში (ნახ.6) ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების ელექტრული წონასწორობის განტოლებები ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდის



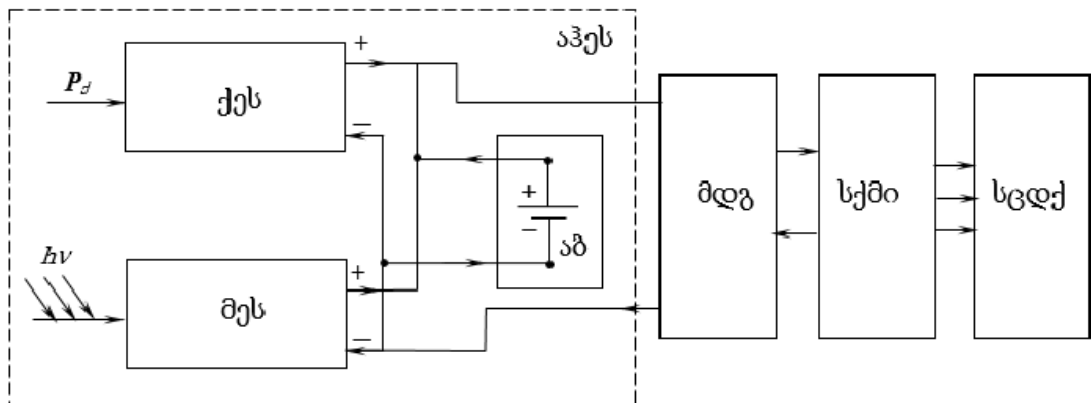
ნახ.4. ჰიბრიდული ელექტრული სადგურის გამომავალი  $u_{dc}$  ძაბვის, მართვის იმპულსების, კომპუტაციური ფუნქციების და ქსელის ძაბვის დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერება.



გამოყენებით უქმი სვლის და დატვირთვის რეჟიმებისათვის ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში:

ა) უქმი სვლის რეჟიმისათვის შესაბამის განტოლებათა სისტემას აქვს შემდეგი სახე:

$$\left. \begin{aligned}
 U_m^I \sin \left[ \omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \delta \right] &= R^I i_{Kj}^I + \frac{d\psi_{Kj}^I}{dt}; \quad k = 1, 2, 3; \\
 -u_{Kj}^{II} &= \frac{d\psi_{Kj}^{II}}{dt}; \quad \psi_{Kj}^I = L_S^I i_{Kj}^I + \sum_{k=1}^3 M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_{Kj}; \\
 \psi_{Kj}^{II} &= \sum_{k=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_{Kj}^I; \quad k = 1, 2, 3; \\
 J \cdot R_p - E_{\text{სბ}} &= I_p R_p + i_{\text{ფ}} R_S + i_{\text{სბ}} R_{\text{სბ}}; \quad U_{a_1 b_1} = U_{a_2 b_2} = U_{dc}; \\
 J &= I + I_p + i_{\text{ფ}}; \\
 i_{\text{ფეს}} &= i_{\text{ფ}} + i_{\text{სბ}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$



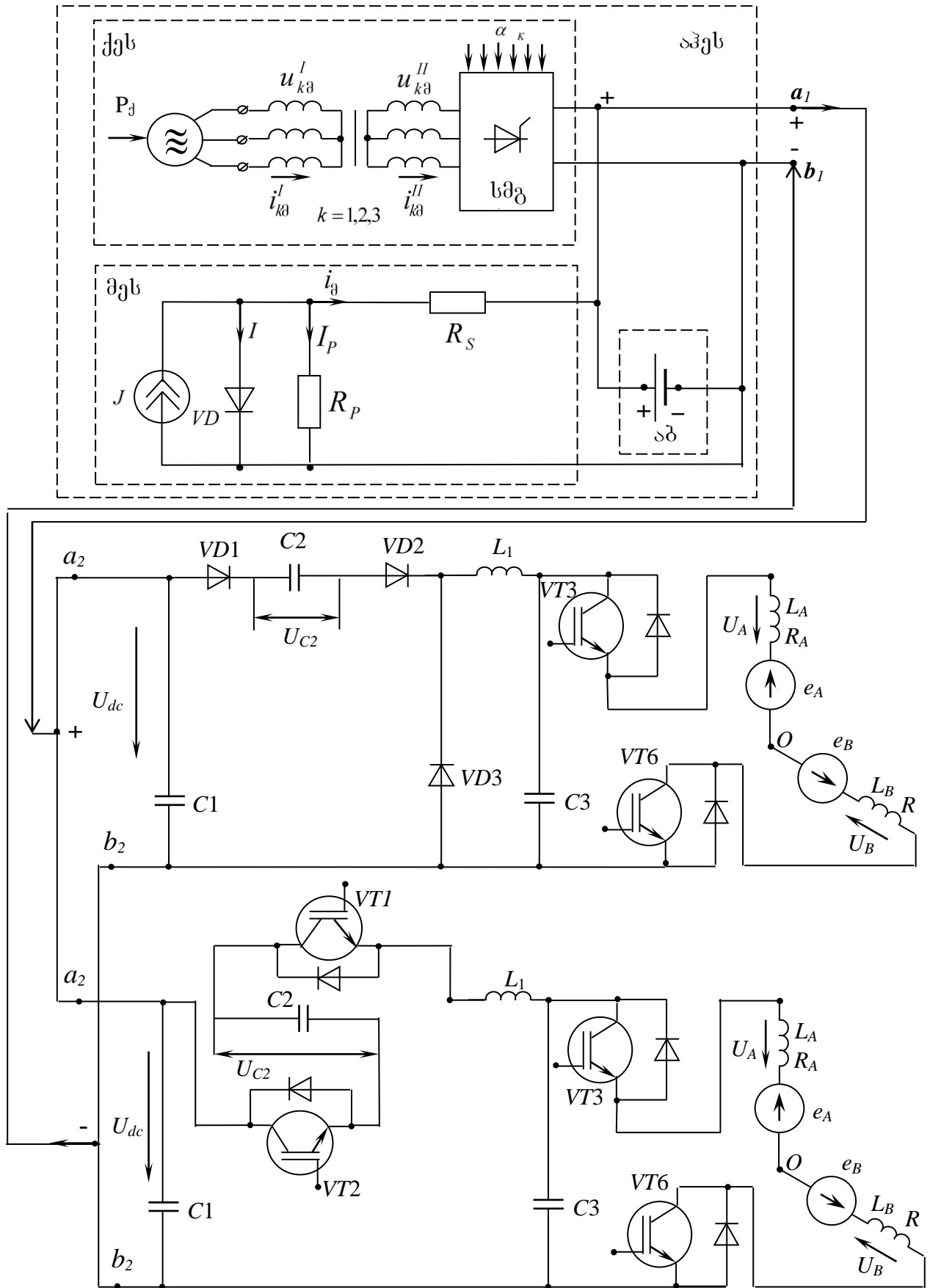
ნახ.5 ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემა

ბ) დატვირთვის რეჟიმში ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტრო-ენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის დროის განზოგადებული კენტი ინტერვალებისათვის ( $0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6}$ ; ნახ.4.ი) გვაქვს შემდეგი განტოლებათა სისტემა. (ნახ.6–ზე გამორთულია VT1, VT2-IGBT ტრანზისტორული მოდულები):

$$\left. \begin{aligned}
& U_m^I \sin\left[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3} + \delta\right] = R^I i_{Kj}^I + \frac{d\psi_{Kj}^I}{dt}; \quad -u_{Kj}^I = R^I i_{Kj}^I + \frac{d\psi_{Kj}^I}{dt}; \\
& k = 1, 2, 3; \\
& \psi_{Kj}^I = L_S^I i_{Kj}^I + \sum_{k=1}^3 [M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_{Kj}^I + M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_{Kj}^{II}]; \\
& \psi_{Kj}^{II} = L_S^{II} i_{Kj}^{II} + \sum_{k=1}^3 [M^{22} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^{II}) i_{Kj}^{II} + M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_{Kj}^I]; \\
& J \cdot R_p - E_{\delta} = I_p R_p + i_{\delta} R_S + i_{\delta} R_{\delta}; U_{a_1 b_1} = U_{a_2 b_2} = U_{dc}; J = I + I_p + i_{\delta}; i_{\delta} = i_{\delta} + i_{\delta}. \\
& u_1 = u_{c2} + u_{dc0}; \quad i = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} + C_2 \frac{du_{c2}}{dt}; \quad u_{dc0} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + u_{c3}; \\
& i_{L1} = C_3 \frac{du_{c3}}{dt} + i_A; \quad U_{dc} = u_{c2} + u_{dc0}; \quad u_{A0} = -U_{mc} \sin(\omega t + 30^\circ); \\
& u_{c3} = u_{dc} = -\sqrt{3} U_{mc} \sin(\omega t + 60^\circ); \quad u_{c1} = u_{c2} + u_{dc0}; \quad i_A = i_B \\
& \sqrt{3} U_{mc} \sin(\omega t + 60^\circ) = 2R_A i_A + 2 \left( L_A + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_A}{dt}; \quad (12)
\end{aligned} \right\}$$

გ) დატვირთვის რეჟიმში ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტრო-ენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის დროს განზოგადებული ლუწი ინტერვალებისათვის ( $\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{6}$ ; ნახ.4.ი) გვაქვს შემდეგი განტოლებათა სისტემა (ნახ.6-ზე გამორთულია VD1, VD2 ნახევარგამტარული დიოდები და ჩართულია VT1, VT2-IGBT ტრანზისტორული მოდულები):

$$\left. \begin{aligned}
& \sqrt{3} U_{mc} U_m^I \sin\left[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3} + \delta\right] = R^I i_{Kj}^I + \frac{d\psi_{Kj}^I}{dt}; \quad -u_{Kj}^{II} = R^{II} i_{Kj}^{II} + \frac{d\psi_{Kj}^{II}}{dt}; \\
& k = 1, 2, 3; \\
& \psi_{Kj}^I = L_S^I i_{Kj}^I + \sum_{k=1}^3 [M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_{n_j}^I + M^{12} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^I) i_{n_j}^{II}]; \\
& \psi_{Kj}^{II} = L_S^{II} i_{Kj}^{II} + \sum_{k=1}^3 [M^{22} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^{II}) i_{n_j}^{II} + M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_{n_j}^I]; \\
& J \cdot R_p - E_{\delta} = I_p R_p + i_{\delta} R_S + i_{\delta} R_{\delta}; U_{a_1 b_1} = U_{a_2 b_2} = U_{dc}; J = I + I_p + i_{\delta}; i_{\delta} = i_{\delta} + i_{\delta}. \\
& i_A = i_B; \quad i_{VD3} = 0; \quad i_{c2} = i_{L1}; \quad u_{dc} = u_{c2} + u_{dc0}; \quad u_{dc0} = u_{L1} + u_{dc}; \\
& u_{dc} = u_{c3} = u_{A0} - u_{B0}; \quad u_{A0} = -U_{mc} \sin(\omega t + 60^\circ); \\
& u_{B0} = U_{mc} \sin(\omega t + 120^\circ); \quad u_{dc} = u_{c3} = \sqrt{3} U_{mc} \sin(\omega t + 90^\circ); \\
& U_{mc} \sin 60^\circ \sin(\omega t + 90^\circ) = R_C i_A + \left( L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_A}{dt}; \quad (13) \\
& \sin(\omega t + 60^\circ) = 2R_B i_B + 2 \left( L_B + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_B}{dt};
\end{aligned} \right\}$$



ნახ.6. ჰაეს-ის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა

როგორც (12,13) განტოლებებიდან ჩანს, აქ გათვალისწინებულია სამფაზა ცვლადი დენის მიმღები ქსელის ექვივალენტური აქტიური წინაღობა  $2R_K (k = A, B, C)$  და ექვივალენტური ინდუქციურობა  $2 \left( L_K + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right)$ ,  $(k = A, B, C)$ , სადაც  $L_K (k = A, B, C)$  თითოეული ფაზის ინდუქციურობაა,  $M^{11}$  -თითოეული ფაზის სრული ინდუქციურობა, ხოლო  $M^{12}$  - კი ფაზებს შორის ურთიერთ ინდუქციურობაა. გარდა ამისა, კენტ რეჟიმებში ექვივალენტური სინუსოიდების ამპლიტუდების მნიშვნელობები ორჯერ მეტია ლუწ რეჟიმებში ექვივალენტური სინუსოიდების ამპლიტუდებზე.

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებულია (12), (13) განტოლებათა სისტემის ამოხსნის პროცედურა და მიღებულია გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესებისათვის სამართლიანი  $(2n - 1)$  კენტი და  $2n$  -ლუწი ინტერვალებისათვის განზოგადებული  $f^{2n-1}(t)$  და  $f^{2n}(t)$  ელექტრული სიდიდეების გამოსახულებები.

ერთმანეთის მომდევნო მოცემულ ინტერვალებში  $f^{2n-1}(t)$  და  $f^{2n}(t)$  საძიებელი ელექტრული სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობების ერთმანეთთან გატოლების (დამყარებული პროცესების მიღწევის) პირობიდან გამომდინარე, ვღებულობთ იმ  $n$ -ინტერვალის რიგითი ნომრის ზოგად გამოსახულებას ერთიანი წრედის პარამეტრებზე დამოკიდებულებით, რომლიდანაც იწყება პროცესის დამყარება:

$$n = 1 + \frac{6}{\pi} \omega \tau_c l_n \left[ \frac{1 + r^{2n}(0)(B_c - \sqrt{3}G_c)}{1 + 2r^{2n}(0)G_c} \right]; \quad (14)$$

სადაც (14)-ში შემავალი ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს:

$$\tau_c = \frac{L_K + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12}}{2R_K}; \quad \varphi_c = \arctg \frac{\omega L_c}{R_c};$$

$$G_c = \frac{R_c}{R_c^2 + (\omega L_c)^2}; \quad B_c = \frac{\omega L_c}{R_c^2 + (\omega L_c)^2}; \quad r^{2n}(0) = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{U_{mc}}{i_k^{2n}(0)}; \quad (15)$$

(14), (15)-დან გამომდინარეობს, რომ თუ ადგილი აქვს

$$i_k^{2n}(0) > \frac{3}{2} U_{mc} \cdot G_c \operatorname{ctg} \varphi_c, \quad \text{მაშინ პროცესები დამყარებულია.}$$

სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილია ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება განზოგადებულ კენტი  $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}$  და ლუწ  $(2n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n\frac{\pi}{6\omega}$ ,  $k = A, B, C$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$  ინტერვალისათვის.

მიღებულია თითოეული განზოგადებული კენტი და ლუწი ინტერვალისათვის საძიებელი ელექტრული სიდიდეების შემდეგი ინტეგრალური გამოსახულებები მატრიცულ სახეში:

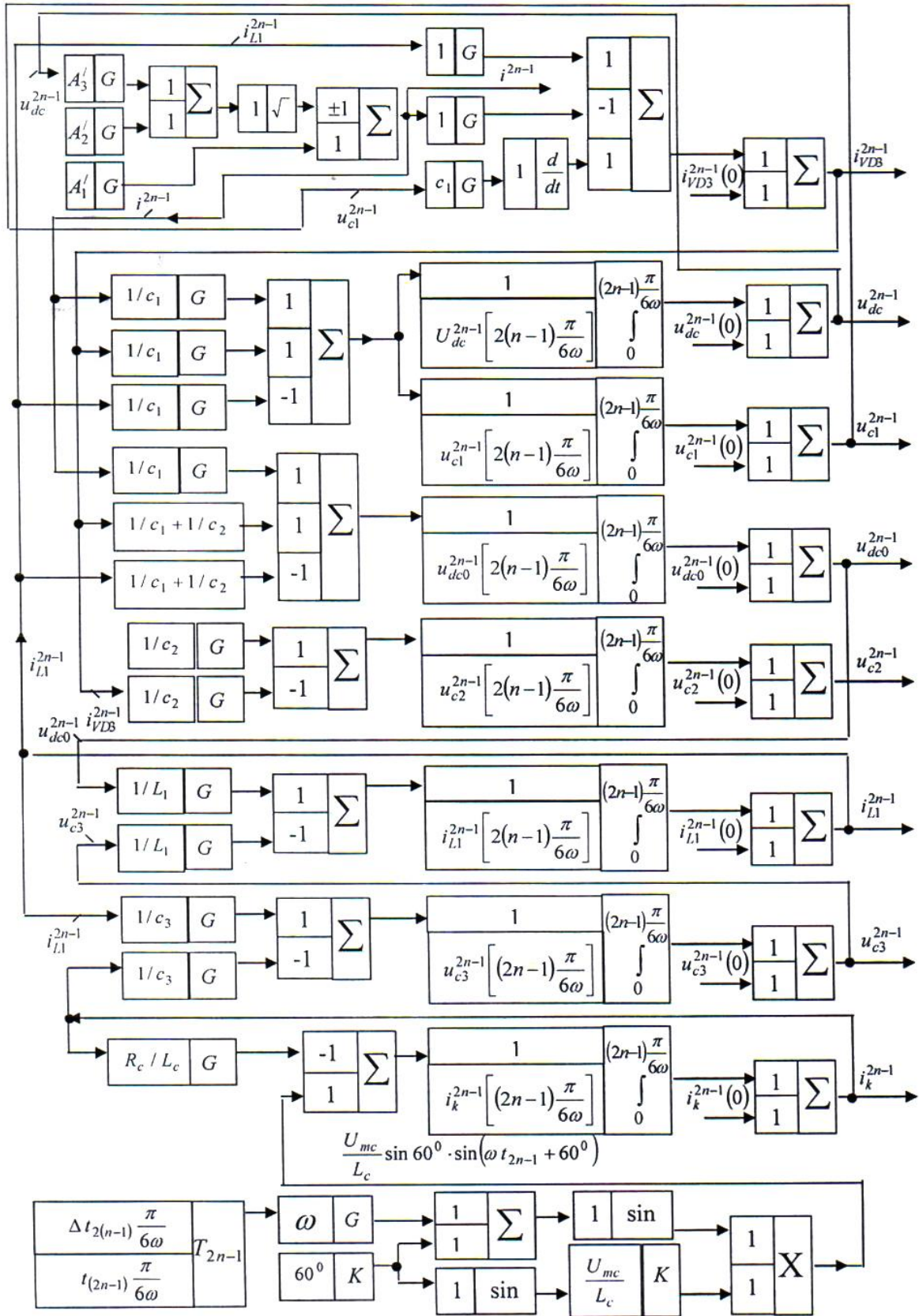
$$\|f(t_{2n-1})\| = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \{ \|(\Delta^{2n-1})^{-1}\| \cdot \|f'_1(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\| \} dt_{2n-1} + \|f[t_{2n-1}(0)]\|; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

$$\|f(t_{2n})\| = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n)\frac{\pi}{6\omega}} \{ \|(\Delta^{2n})^{-1}\| \cdot \|f'_2(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\| \} dt_{2n} + \|f[t_{2n}(0)]\|; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

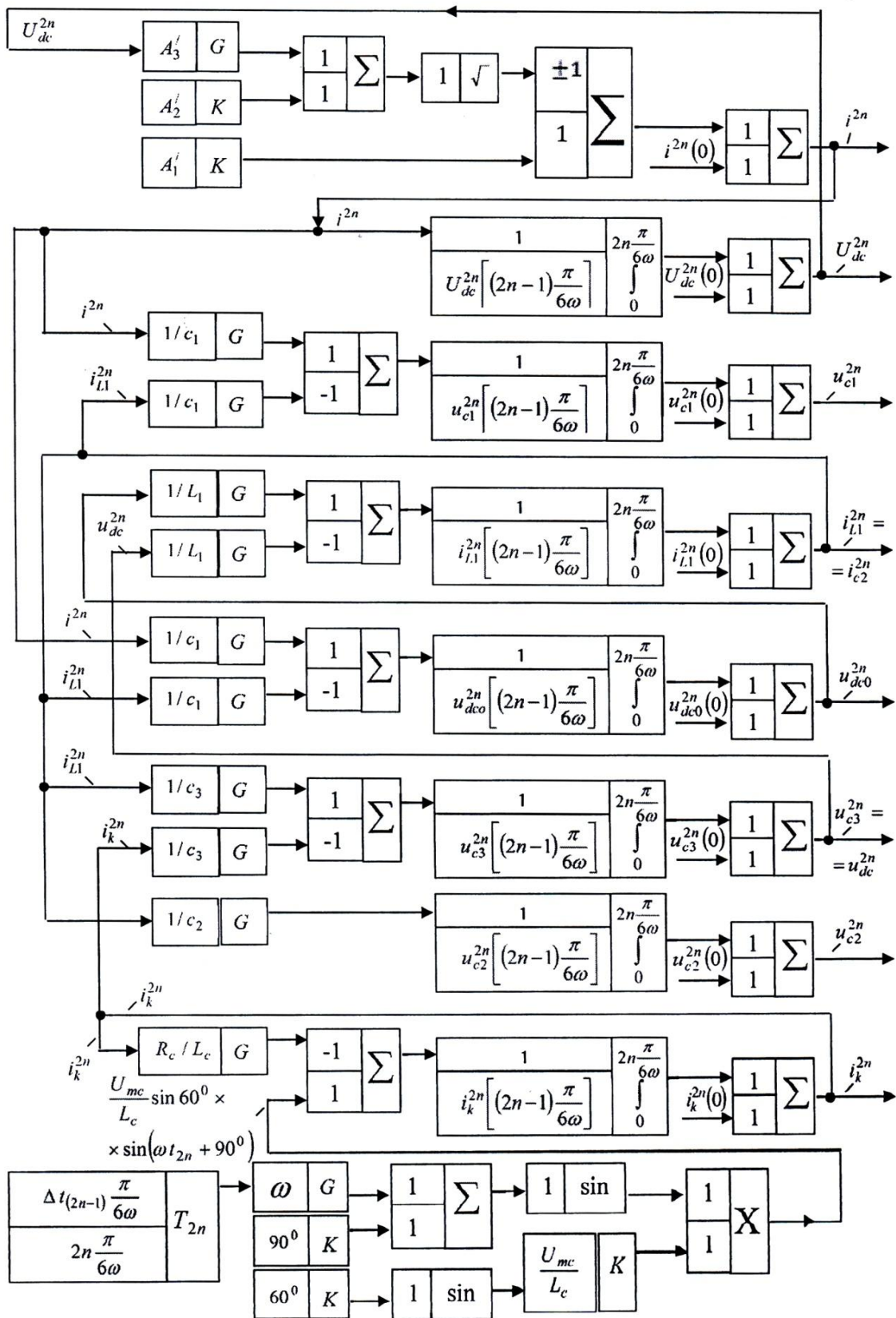
(16), (17)–ში შესაბამისად გვაქვს:

$$\|f'_1(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\| = \left\| \begin{array}{c} i^{2n-1} \\ i_{VD3}^{2n-1} \\ i_{L1}^{2n-1} \\ i_k^{2n-1} \\ u_{dco}^{2n-1} \\ u_{dc}^{2n-1} \\ U_{mc} \sin(\omega t_{2n-1} + 60^\circ) \end{array} \right\|; \quad (18)$$

$$\|f'_2(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\| = \left\| \begin{array}{c} i^{2n} \\ i_{L1}^{2n} \\ i_k^{2n} \\ u_{dco}^{2n} \\ u_{dc}^{2n} \\ U_{mc} \sin(\omega t_{2n} + 90^\circ) \end{array} \right\|; \quad (19)$$



ნახ.7. გარდამავალი პროცესების მოდელის სრულყოფილი სქემა კენტი რეჟიმების განზოგადებულ  $2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1) \frac{\pi}{6\omega}$ ;  $n=1,2,3,\dots, k=A,B,C$ . ინტერვალებში



ნახ.8. გარდამავალი პროცესების მოდელის სრულყოფილი სქემა ლუწი რეჟიმის განზოგადებულ  $(2n-1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n \frac{\pi}{6\omega}$ ;  $n=1,2,3,\dots$ ,  $k=A,B,C$ . ინტერვალებში.

$\|(\Delta^{2n-1})^{-1}\|$  და  $\|(\Delta^{2n})^{-1}\|$  –შებრუნებული დეტერმინანტების მატრიცების გამოსახულებები გახსნილ სახეში ნათლად არის წარმოდგენილი სადისერტაციო დასრულებულ ნაშრომში.

$\|f[t_{2n-1}(0)]\|$  და  $\|f[t_{2n}(0)]\|$ , შესაბამისად, არის  $\|f(t_{2n-1})\|$  და  $\|f(t_{2n})\|$  საძიებელი ცვლადების საწყისი მნიშვნელობები განსახილველი კენტი და ლუწი ინტერვალების დასაწყისში.

სადისერტაციო ნაშრომში განხილულია გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურული სქემის ელემენტების ძირითადი თვისებები და (16)-(19) გამოსახულებების საფუძველზე აგებულია გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები კენტ (ნახ.7) და ლუწ (ნახ.8) განზოგადებულ ინტერვალებში.

სადოქტორო სადისერტაციო დასრულებულ ნაშრომში წარმოდგენილია ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა პარალელური მუშაობის კენტი რეჟიმების განზოგადებულ  $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}$  და ლუწი რეჟიმების განზოგადებული  $(2n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n\frac{\pi}{6\omega}$  ინტერვალებისათვის:

$$\|f[(k+1)T]\| = e^{\|A^{2n-1}\| \cdot T} \cdot \|f(kT)\| + (e^{\|A^{2n-1}\| \cdot T} - \|1\|) \cdot \|u(kT)\| ;$$

$$n = 1, 2, 3, \dots ; \quad K = 0, 1, 2, 3, \dots ; \quad (20)$$

$$\|f[(k+1)T]\| = e^{\|A^{2n}\| \cdot T} \cdot \|f(kT)\| + (e^{\|A^{2n}\| \cdot T} - \|1\|) \cdot \|u'(kT)\| ;$$

$$n = 1, 2, 3, \dots ; \quad K = 0, 1, 2, 3, \dots ; \quad (21)$$

(20),(21)-ში შესაბამისად  $\|u(kT)\|$ ,  $\|u'(kT)\|$  მატრიცებისათვის გვაქვს:

$$\|u(kT)\| = \|I^{2n-1}(kT)\| - \|f(kT)\| \quad n = 1, 2, 3, \dots ; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots ; \quad (22)$$

$$\|u'(kT)\| = \|I^{2n}(kT)\| - \|f(kT)\| \quad n = 1, 2, 3, \dots ; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots ; \quad (23)$$

მიღებული (20) – (23) განტოლებები წარმოადგენენ საძიებელ სხვაობით განტოლებებს. ისინი წარმოდგენილია რეკურენტული ფორმულის სახით და იოლად ემორჩილება კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით რიცხვითი მეთოდებით გაანგარიშებას.



## დასკვნა

1. პირველად ენერგეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში შესრულდა მიზანმიმართული თეორიული სამუშაოები მზის ენერჯის ფოტოელექტრული, ქარის ენერჯის მექანოტრონული გარდამქმნელების და აკუმულიატორული ბატარეების დამუხტვა-განმუხტვის მიკროპროცესორული კონტროლიორით სელექციურობის საფუძველზე ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის, ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში, საექსპლუატაციო და საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემის შექმნის და მათში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საკითხები.

2. განსაზღვრულია არატრადიციული ენერგორესურსების შესაძლო მარაგი. შესწავლილია ქარის ასინქრონული გენერატორის მუშაობის გენერატორული, ძრავული და დამუხრუჭების რეჟიმები; ამ რეჟიმებში გენერატორის როტორის ბრუნვის კუთხური სიხშირის, როტორის გრანგულში გამავალ დენსა და მასში დაინდუქცირებული ე.მ. ძალის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხის ცვალებადობის კანონზომიერება სრიალზე დამოკიდებულებით. პირველად მიღებულია ქარის ასინქრონული გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე სამფაზა ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობების თეორიული ზოგადი გამოსახულებები ქარის, ლილვზე დამაგრებული ფრთის და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ყველა შესაძლო პარამეტრის გათვალისწინებით.

3. წარმოდგენილია მზის ფოტოელექტრული ელემენტის შენაცვლების სრულყოფილი ელექტრული სქემა, რომელშიც გათვალისწინებულია ყველა დამახასიათებელი საანგარიშო პარამეტრი. დადგინდა ფოტოელემენტის უქმი სვლის, ნომინალური რეჟიმის და მოკლე შერთვის პარამეტრებზე დამოკიდებული ექვივალენტური კოეფიციენტები. ტეილორის მწკრივებად დაშლის შედეგად მიღებულ იქნა მზის ელემენტის აქტიური სიმძლავრის ოპტიმალური რაციონალური გამოსახულება მრავალწევრის სახით.

დადგენილია ძაბვის და დენის ოპტიმალურ-ექსტრემალური მნიშვნელობები. მზის ელემენტის უქმი სვლის, ოპტიმალურ-ექსტრემალური და მოკლე შერთვის რეჟიმების დამახასიათებელი შესაბამისი სამი წერტილის ფარდობითი კოორდინატების მიხედვით ლაგრანჟის ინტერპოლაციის ფორმულის საფუძველზე დადგენილი იქნა მზის ელემენტის საინჟინრო გათვლებისათვის მოსახერხებელი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გამოსახულება კვადრატული სამწევრის სახით.

4. არატრადიციული განახლებადი ენერჯების შესაბამისი გარდაქმნილი ელექტრული ენერჯის მიკროპროცესორული კონტროლიორით სელექციური ერთობლივი გამოყენების შესაძლებლობამ შეგვიქმნა თანამედროვე ავტონომიური ჰიბრიდული მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული და საანგარიშო ელექტრული სქემები საქართველოს ელექტროსისტემის ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის განხორციელების პირობებში.

5. დადგინდა ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული გაერთიანებული სისტემის საძიებელი ელექტრული სიდიდეების დროში ცვალებადობის ერთი პერიოდის განმავლობაში მდგრადი განზოგადებული ექვსი კენტი და ექვსი ლუწი დროის ინტერვალი. შესაბამისად, ამ ინტერვალებში შესწავლილია აღნიშნულ გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრული სიდიდეების, მართვადი ნახევარგამტარული ვენტის მართვის იმპულსების და კომუტაციური ფუნქციების დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერებანი.

6. დამუშავებულია ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების მეთოდიკა. შედგენილია განზოგადებული კენტი და ლუწი დროის ინტერვალებისთვის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები რეზულტირებული კომპლექსური საძიებელი ელექტრული სიდიდეების მიმართ. დადგენილია

ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური პარამეტრები და კოეფიციენტები. კომპლექსურ რეზულტირებულ ცვლადთა უკუ გარდაქმნის მატრიცების საფუძველზე მიღებულია შესაბამისი ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების გამოსახულებები.

7. ჩატარებულია მიღებული განტოლებათა სისტემის ამოხსნის პროცედურა და მიღებულია მოცემულ პარამეტრებზე დამოკიდებული დამყარებული პროცესების შესაბამისი განზოგადებული  $n$  ინტერვალის გამოსახულება, გამომდინარე ერთმანეთის მომდევნო  $2n-1$  კენტ და  $2n$  ლუწ ინტერვალეებში ელექტრული სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობების ერთმანეთთან გატოლებიდან.

8. შესრულებულია ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემების ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული პროცესების კომპიუტერული მოდელირება განზოგადებული კენტი და ლუწი ინტერვალეებისათვის. განსაზღვრულია თითოეული საანგარიშო ელექტრული სიდიდის დროში წარმოებულების გამოსახულებები მატრიცულ ფორმაში, რომელთა საფუძველზედაც მიღებულია კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობა.

9. განხილულია ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის მათემატიკური ოპერაციების ელემენტების ძირითადი თვისებები. თითოეული განზოგადებული კენტი და ლუწი ინტერვალისათვის შედგენილია გარდამავალი და დამყარებული პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები.

10. დამუშავებულია ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში საძიებელ ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების შედგენის მეთოდიკა და მათი რიცხვითი ამოხსნა განზოგადებული კენტი და ლუწი რეჟიმების შესაბამისი ინტერვალეებისათვის. მიღებულია შესაბამისი სხვაობითი განტოლებები რეკურენტული ფორმულის სახით, რომლებიც შეთავსებადია კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით პროცესების რიცხვითი მეთოდებით გაანგარიშებასთან.

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ძირითადი ნაშრომები:

1. კობხრიძე გ. რეზვიაშვილი ზ, ფხაკაძე შ. პაპიძე ზ, ტეტუნაშვილი ე. ქარის ელექტროენერგეტიკული დანადგარების ერთიანი გარდამქმნელი სისტემა და მუშაობის რეჟიმების დადგენა. ჟურნალი „ენერჯია“ N4(72). თბილისი, 2014წ. გვ.41-44.

2. ქებურია მ. ქათამაძე ი. პაპიძე ზ, ერთ მგვტ-მდე სიმძლავრის მცირე ჰეს-ებში ასინქრონული გენერატორების გამოყენების ეკონომიკური ასპექტები. ჟურნალი „ენერჯია“ N3(71). თბილისი, 2014წ. გვ.39-44.

3. კობხრიძე გ. რეზვიაშვილი ზ. ფხაკაძე შ. პაპიძე ზ. ტეტუნაშვილი ე. ენერგოეფექტურ ავტონომიურ ჰიბრიდულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში პროცესების მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში; საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „მდგრადი ენერგეტიკა, გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“ ქუთაისი. საქართველო. 18 ივნისი. 2015 წ. გვ.96-100.

4. კობხრიძე გ. ფხაკაძე შ. პაპიძე ზ. შუშაკიძე თ. ქარისა და მზის ენერჯიების ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნის ტექნოლოგიები. III საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი. საქართველო. 25 ნოემბერი. 2015 წ. გვ.95-99.

5. ფრანგიშვილი გ. პაპიძე ზ. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების სისტემაში. სამფაზა მართვად გამმართველებში ელექტრომაგნიტური პროცესების მათემატიკური მოდელირება. 83-ე სტუდენტთა საერთაშორისო ღია სამეცნიერო კონფერენციაზე წარდგენილი სამეცნიერო ნაშრომი (ხელნაწერის უფლებით). თბილისი 2015 წ. 1-12 გვ.

6. პაპიძე ზ. ქარის და მზის ენერჯიის გარდაქმნის და გამოყენების ტექნოლოგიების დამუშავება. საგანმანათლებლო პროგრამის კვლევითი კომპონენტის კოლოქვიუმი 1-ის სამეცნიერო ნაშრომი (ხელნაწერის უფლებით). სტუ. თბილისი. 2016წ. 1-28გვ.

7. პაპიძე ზ. ფხაკაძე შ. ძირითადი რეჟიმების დადგენა ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში. IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი. საქართველო. 2016 წ. გვ.44-47.

8. პაპიძე ზ. ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში მუშაობის მდგრადი რეჟიმების დადგენა. საგანმანათლებლო პროგრამის კვლევითი კომპონენტის კოლოქვიუმი 2-ის სამეცნიერო ნაშრომი (ხელნაწერის უფლებით). სტუ. თბილისი. 2016წ. 1-24გვ.

9. პაპიძე ზ. ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესები, ქარის ელექტროსადგურისა და სამფაზა მართვადი გამმართველის ერთობლივი მუშაობის პირობებში IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი. საქართველო. 2016 წ. გვ.98-101.

10. პაპიძე ზ. ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში. საგანმანათლებლო პროგრამის კვლევითი კომპონენტის კოლოქვიუმი 3-ის სამეცნიერო ნაშრომი (ხელნაწერის უფლებით). სტუ. თბილისი. 2017წ. 1-52გვ.

11. Папидзе З. Переходные Электромагнитные и электромеханические процессы в ветровых энергоустановках. „Инженерия и технология“-Варшава 2016г.

12. კობხრიძე გ. ფხაკაძე შ. პაპიძე ზ. ტეტუნაშვილი ე. ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემებში აკუმულიატორთა ბატარეების დამუხტვის და განმუხტვის პროცესების მართვა. ჟურნალი „ენერჯია“ N2(82). გვ. 9-13

## Summary

There are presented in doctoral dissertation the following parts: topicality of research; goal and object of research; methods of research; main results and novelty of research; area of potential use of research results; publications; approbation of work and structure of dissertation. There is presented the content of dissertation and shown the issues considered in introduction part.

**In chapter 1** the following items are considered: classification of wind-powered generators; the regimes of asynchronous generators; Instant values on wind-powered generator clamps; physical basics of solar energy conversion process; volt-ampere characteristics of solar photoelectric element; forming general structural scheme of hybrid parallel energetic system; working on autonomic hybrid energetic system principal calculating electric scheme while working in variable electricity network. We have discussed three groups of schemes of wind-wheel devices and their positions according to wind generators.

Functions of asynchronous generators motor, generative and anti-circuit and brake regime are shown. Regulation of reactive power and compensation items are studied. Asynchronous generator excitation items are processed.

The general theoretical images of three-phase voltage straightway meanings on asynchronous generator output clamps are received including wind, the shaft wing and the following parameters of receiving variable current power supply network. Hydrodynamic ratio of the wind-driven wheel resistance; average wind speed; wing's circular movement; wind density; ratio of using wind energy; the area of equivalent Wing surface; the voltage meaning in the entrance of receiver variable current power; the meaning of voltage on the output clamps of wind three-phase generator; shift angle between the voltage in the output clamps of the generator and in the entrance of receiver variable power; the complete circuit equivalent active inductive impedance.

Electric scheme of solar element substitution and its volt-ampere characteristics during different temperature meanings and in various solar radiations are discussed. With the help of Lagrange's interpolation formula and Theylor's rows collapse processes volt-ampere characteristic image we have received three square form for complete accuracy of engineering calculations. We have presented the structural scheme of general modern hybrid parallel power grid, In which we considered both constant and variable power voltage systems.

Principal electronic scheme of impulsive regenerator of constant and variable current single-phase voltage hybrid parallel power grid is processed.

**chapter 2** deals with regime determinations which relate to sustainable modes while working in autonomic hybrid power grid; regimes of hybrid power system; analysis of problems related to small and nontraditional power grid are performed and the main technical requirements that are in energy supply autonomic system are complied with.

The general structural scheme of hybrid parallel power system is presented, where wind power station, solar power station, accumulator battery, constant power generator, three-phase network inventory follower and three-phase alternating current receiver network take a main part. Functions and regimes of each element and variable power receiver network are discussed. Principles and working conditions of these elements are focused.

We have proved time variation of hybrid power energetic united system during some period, while working at power network, stable general six odd and six even regime. Therefore, electrical properties in the abovementioned generator system is studied, control impulses and commutative functions, time dependent regularity algorithm. In hybrid autonomic electrical system in parallel working for calculating odd and even regimes which calculate principal electric schemes are studied.

**chapter 3** focuses on the universal method of math and computer modeling in mathematical and magnetic transitional processes in autonomic hybrid power system, while working simultaneously with power network, general odd and even time interval electric balance equations are made to resulted complex electric magnitude on the basis of processed variable conversion method. We have clarified the equivalent parameters of united generative system and their ratios. On the basis of complex reversibility matrix of resulted variables, adequate phasic electric magnitude instant values are received.

Solving equations resulted in the fact that appropriate expressions are acceptable for each electric magnitude. Theoretical existence of interval expressions depend on the given parameters, on the basis of  $2n-1$  odd and  $2n$  even intervals by equalizing electric variables. Electromagnetic processes of computer modeling perfect work is done for odd and even time intervals. Each electric magnitude that is in time produced expressions in matrix form. By equating determinant to zero we get the condition, when derivatives are huge and with equivalent inductance, the product is considered to be boundless magnitude. It means that we have a chance to get a ratio between parameters and ratios, for which determinant does not become equal to zero. And therefore, commutative overstrain does not happen. While computer modeling it appeared that it's essential to use extra solar element volt-ampere characteristics.

For constructing electromagnetic process structural scheme, adequate mathematic operations are analyzed. Transitional process modeling schemes are made for odd and even intervals. They provide us with the opportunity to visualize mathematic links among magnitudes including basic meanings.

In united generative system the position of variables matrix the method of making equations are processed and their numerical solving for adequate intervals. Appropriate difference equations, as a recurrent formula is received. They are compatible to calculation of numerical method by computer programs.